

4.СОУ 60.3-30019801-050:2008. Правила технічної експлуатації магістральних газопроводів. – К.: ДК «Укртрансгаз», 2008.

5.Петров Е.Г., Новожилова М.В., Гребеннік І.В. Методи і засоби прийняття рішень у соціально-економічних системах. – Харків: ХДТУБА, 2002. – 284 с.

6.Сергиенко И.В. Математические модели и методы решения задач дискретной оптимизации. – К.: Наук. думка, 1985. – 384 с.

*Получено 11.04.2008*

УДК 656.02 : 338.47

Н.И.САМОЙЛЕНКО, д-р техн. наук, И.А.ГАВРИЛЕНКО

*Харьковская национальная академия городского хозяйства*

## **МЕТОД РАСЧЕТА ФУНКЦИОНАЛЬНОЙ НАДЕЖНОСТИ ТРУБОПРОВОДНЫХ ТРАНСПОРТНЫХ СИСТЕМ**

Рассматриваются вопросы повышения функциональной надежности трубопроводных транспортных систем (ТТС). Разработан метод расчета функциональной надежности в ТТС. Предложены пути повышения функциональной надежности ТТС.

Современные ТТС представляют собой сложные инженерные сооружения, требующие для своего создания и бесперебойной длительной эксплуатации больших материальных затрат. Эти затраты связаны, с одной стороны, с необходимостью удовлетворять текущую потребность населения в том или ином целевом продукте (ЦП), с другой – обеспечивать бесперебойную работу сети в обозримом будущем, т.е. в течение некоторого периода времени  $T$ . Важную роль в эксплуатации систем играет функциональная надежность. В обеспечении высокой функциональной надежности в равной степени заинтересованы и службы эксплуатации, и все потребители.

Функциональной надежностью будем называть способность системы ТТС удовлетворять своему назначению, т.е. успешно решать свои функциональные задачи. Для ТТС – это поставлять целевой продукт потребителям с количественными и качественными параметрами, оговоренными в двухсторонних договорах. Функциональная надежность системы, как правило, определяется на основе статистической обработки данных о поведении системы, накопленных за довольно большой промежуток времени эксплуатации системы. Расчетные методы определения функциональной надежности системы на основе известной технической надежности ее элементов разработаны и применимы только для систем малой размерности [1]. Связано это со сложностью формализации влияния структуры системы на ее функциональную надежность.

За последние годы проведены исследования в области повышения функциональной надежности, изложенные в [2, 3]. Основными теоре-

тическими предпосылками для разработки метода расчета надежности поставки ЦП конкретному потребителю служат следующие утверждения:

- надежность функционирования (техническая надежность) аварийно-ремонтной зоны (АРЗ) не зависит от структуры АРЗ, поскольку выход из строя любого структурного элемента АРЗ приводит к вынужденному прекращению эксплуатации всех элементов АРЗ на период устранения неисправности;

- надежность поставки ЦП (функциональная надежность) инвариантна по отношению к потребителям одной и той же аварийно-ремонтной зоны;

- функциональная надежность относительно потребителей конкретной АРЗ зависит от технической надежности всех АРЗ сети, структуры объединения АРЗ в сеть и места расположения конкретной АРЗ в этой структуре;

- функциональная надежность относительно потребителей одной и той же АРЗ по своей величине меньше или равна технической надежности этой зоны.

Целью настоящего исследования является разработка метода расчета функциональной надежности в сложных ТТС. Предлагаемый метод позволяет получить вероятность поступления ЦП конкретному потребителю с учетом структуры сети и надежности функционирования отдельных ее элементов (паспортной или статистически накопленной). Метод ориентирован на трубопроводные сети, которые по сложности своей структуры соизмеримы со сложностью трубопроводных транспортных сетей, функционирующих в различных отраслях народного хозяйства (водо-, тепло-, газоснабжение). Расчетная величина отвечает принятым государственным стандартам по надежности.

Исходными данными для расчета функциональной надежности сети по осуществлению поставок ЦП конкретным пользователям с помощью предлагаемого метода являются:

- топологическая структура сети с указанием длины пространственно протяженных элементов (трубопроводов), мест расположения запорной арматуры и активных элементов (насосных станций, компрессоров) и потребителей;
- интенсивности отказов пространственно протяженных элементов сети и интенсивности их восстановления;
- вероятности безотказной работы пространственно не протяженных элементов сети (активных элементов, запорной арматуры, распределительных пунктов и др.).

Метод расчета функциональной надежности включает семь последовательных этапов (задач):

1. Формирование математической модели сложной трубопроводной транспортной сети в виде взвешенного графа.
2. Разбиение исходного взвешенного графа ТТС на подграфы, каждый из которых соответствует одной АРЗ.
3. Расчет технической надежности АРЗ.
4. Преобразование исходного взвешенного графа сети большой размерности во взвешенный граф АРЗ малой размерности (замена каждой АРЗ одной вершиной).
5. Построение расчетных моделей функциональной надежности относительно АРЗ, которые не стыкуются непосредственно с источником ЦП.
6. Анализ каждой расчетной модели с целью выявления и удаления из модели несущественных связей между аварийно-ремонтными зонами и самих зон, не влияющих на функциональную надежность.
7. Расчет функциональной надежности сети относительно АРЗ и функциональной надежности сети относительно потребителей одной и той же зоны с помощью классических методов расчета надежности функционирования технических систем.

Рассмотрим каждый из этапов подробнее.

1. Математическую модель сложной ТТС представим в виде ориентированного взвешенного графа

$$G[h, z, l, \lambda, \mu, p] = (V, E; h, z, l, \lambda, \mu, p), \quad (1)$$

где  $V$  – множество вершин графа, соответствующих водопроводным колодцам;  $E$  – множество дуг графа, соответствующих реальным трубопроводам;  $h$  – весовая функция на вершинах графа, определяющая высоту колодца над уровнем моря;  $z, l, \lambda, \mu, p$  – весовые функции на ребрах графа, соответственно определяющие наличие и расположение арматуры, длину, интенсивность износа и интенсивность восстановления трубопроводов, техническую надежность запорной арматуры.

2. Решение задачи разбиения графа ТТС на подграфы, каждый из которых соответствует одной АРЗ, включает решение двух частных задач:

- задача выделения подграфа АРЗ для произвольно выбранной дуги графа, или задача локализации АРЗ для произвольно выбранного трубопровода;
- задача выделения из заданной АРЗ существенной запорной арматуры.

Схема алгоритма решения задачи, производящей полное разбиение исходного графа сети на подграфы АРЗ и выделение в каждой АРЗ существенных задвижек изображена на рис.1.

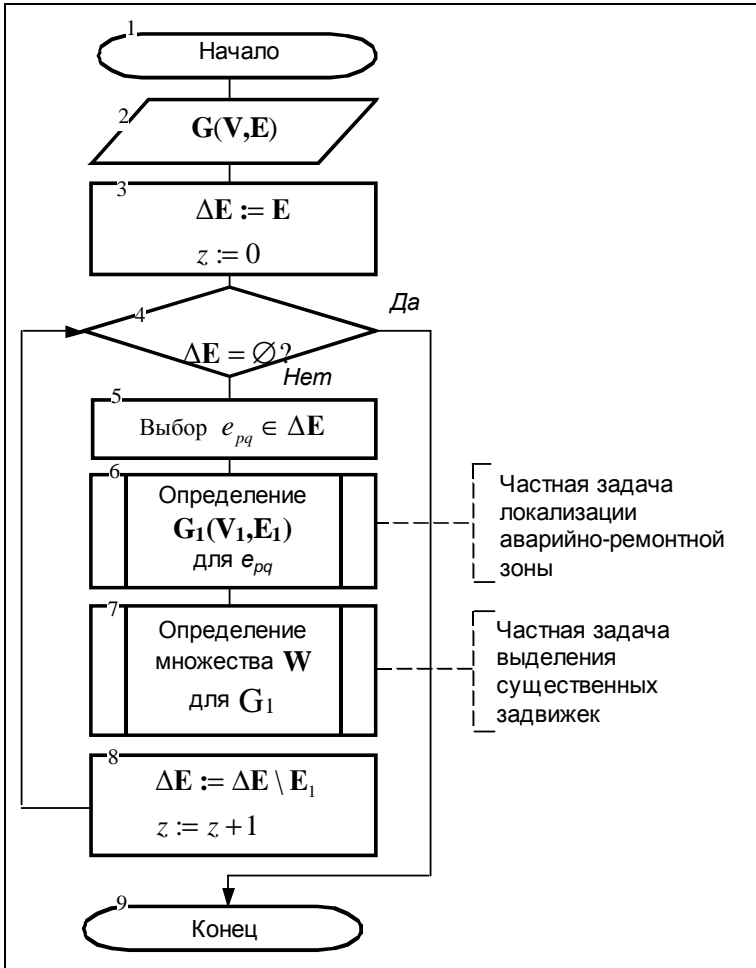


Рис. 1 – Схема алгоритма решения глобальной задачи разбиения графа сети на подграфы аварийно-ремонтных зон

3. Техническую надежность каждой зоны  $P_{Z_k}$  можно рассчитать четырьмя методами:

– аналитическим методом с помощью выражения

$$P_{Z_k} = \left( \prod_{i=1}^{t_k} p_i \right) \cdot \left( \prod_{i=t+1}^{t_k+z_k} p_i \right) = \prod_{i=1}^{t_k+z_k} p_i, \quad (2)$$

где  $t_k$  – количество дуг (трубопроводов) в графе АРЗ  $Z_k$ ;  $Z_k$  – количество задвижек в зоне  $Z_k$ ;

- статистическим методом;
- статистико-аналитическими методами теории массового обслуживания.

Выбор метода зависит от обстоятельств, при которых требуется выполнить расчет технической надежности. При эксплуатации сети в течение 5-20 лет предпочтение следует отдавать статистико-аналитическим методам. При длительной эксплуатации сети в течение более 20 лет наиболее точные результаты обеспечивает статистический метод.

4. На основе данных, полученных на предыдущих этапах, строится взвешенный граф

$$Z[p, p_a] = (V_z, E_{z_z}; p, p_a), \quad (3)$$

где  $V_z$  – множество вершин графа, соответствующих источнику ЦП (0-я вершина) и аварийно-ремонтным зонам,  $V_z = \{v_k\}_0^z$ ;  $E_z$  – множество дуг графа, соответствующих существенной запорной арматуре, которая объединяет источник ЦП и АРЗ в единую сеть,  $E_z = \{e_{ij} = (\overline{v_i v_j}) | i, j = \overline{0, z}, i \neq j\}$ ;  $z$  – количество АРЗ в сети;  $p$  – весовая функция на вершинах графа, определяющая техническую надежность соответствующей АРЗ;  $p_a$  – весовая функция на дугах графа, определяющая техническую надежность соответствующей запорной арматуры.

Результатом выполнения этапа является упрощенный граф АРЗ  $Z_{ynp}[p, p_a]$ .

5. Информация, необходимая для построения расчетных моделей, содержится во взвешенном графе АРЗ  $Z_{ynp}[p, p_a]$ , и сами расчетные модели представляют собой взвешенные подграфы  $Z_{fk}[p, p_a]$  ( $k = \overline{1, z}$ ):  $Z_{fk}[p, p_a] \subseteq Z_{ynp}[p, p_a]$ .

В результате выполнения этапа упрощенный граф АРЗ  $Z_{ynp} [p, p_a]$  преобразуется в систему расчетных моделей:

$$Z_{ynp} [p, p_a] \Rightarrow \begin{cases} Z_{f_1} [p, p_a]; \\ Z_{f_2} [p, p_a]; \\ \dots \\ Z_{f_z} [p, p_a]. \end{cases} \quad (4)$$

6. Проводится анализ каждой  $k$ -й расчетной модели в (4) с целью выявления и удаления из нее несущественных связей между вершинами (АРЗ) и самих вершин, которые не влияют на функциональную надежность сети относительно  $k$ -й АРЗ.

В результате выполнения данного этапа система расчетных моделей (4) преобразуется в новую систему расчетных моделей:

$$\begin{matrix} Z_{f_1} [p, p_a]; \\ Z_{f_2} [p, p_a]; \\ \dots \\ Z_{f_z} [p, p_a], \end{matrix} \Rightarrow \begin{cases} Z'_{f_1} [p, p_a]; \\ Z'_{f_2} [p, p_a]; \\ \dots \\ Z'_{f_z} [p, p_a], \end{cases} \quad (5)$$

где  $Z'_{f_k} [p, p_a] \subseteq Z_{f_k} [p, p_a]$ ,  $k = \overline{1, z}$ .

7. Расчет функциональной надежности сети относительно  $k$ -й зоны АРЗ  $P_{zk}^f$  для каждой расчетной модели  $Z'_{f_k} [p, p_a]$  проводится по методике расчета надежности технических систем со смешанным (последовательным и параллельным) соединением элементов. Порядок расчета отражен на схеме алгоритма (рис.2).

Циклический процесс замены продолжается до тех пор, пока граф не будет включать только один элемент. Рассчитанная эквивалентная надежность этого элемента и будет являться искомой функциональной надежностью сети относительно  $k$ -й зоны.

$$P_{zk}^f = P_k^f, \quad k = \overline{z+1, z_c}. \quad (6)$$

Величина  $P_{zk}^f$  показывает, с какой вероятностью трубопроводная сеть обеспечивает поступление ЦП от источника в  $k$ -ю АРЗ. С точки зрения потребителей, наиболее привлекательными являются зоны со значениями  $P_{zk}^f$ , близкими к единице. Поэтому при всех равных прочих условиях АРЗ, которые стыкуются с источником ЦП, являются наиболее надежными.

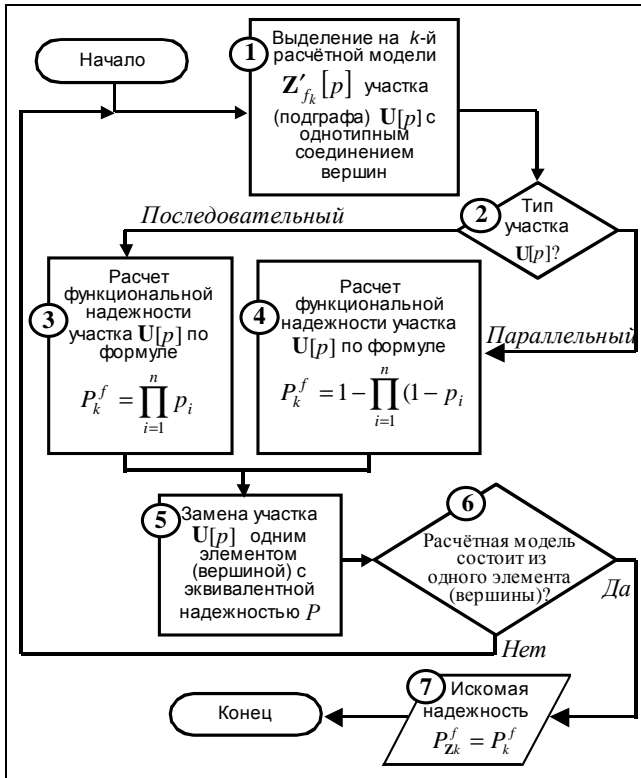


Рис.2 – Схема алгоритма расчета надежности системы со смешанным соединением элементов

С учетом АРЗ, которые стыкуются с источником ЦП, выражение (6) примет вид:

$$P_{Z_k}^f = \begin{cases} P_{Z_k} \cdot \prod_{i=1}^{aard W_k} p_{ki}, & k = \overline{1, z}; \\ P_k^f, & k = \overline{z+1, z_c}. \end{cases} \quad (7)$$

Выражение (7) является конечным искомым результатом разработанного метода расчета функциональной надежности ТТС.

Анализ выражения (7) позволяет сделать следующие выводы. Функциональную надежность сети относительно потребителей АРЗ, которая стыкуется с источником ЦП, можно повысить только за счет увеличения технической надежности этой зоны, т.е. за счет разделения

зоны на две и более зоны (с меньшей протяженностью трубопроводов) путем ввода новых существенных задвижек. Функциональную надежность сети относительно потребителей АРЗ, которая не стыкуются с источником ЦП, можно повысить за счет увеличения технической надежности этой зоны или за счет увеличения функциональной надежности сети относительно этой же зоны. Для зон, в которые ЦП от источника попадает, минуя другие зоны, повышение надежности может быть достигнуто и за счет дробления АРЗ, а также за счет структурных изменений сети, а именно: закольцовывания сети, увеличения числа альтернативных путей доставки ЦП от источника в зону.

1. Надежность систем энергетики и их оборудования. В 4-х т. Т.4. Надежность систем теплоснабжения / Под общ. ред. Ю.Н.Руденко. – М.: Энергоатомиздат, 2000. – 351 с.

2. Самойленко Н.И. Компьютерные интегрированные информационно-графические технологии рациональной эксплуатации и развития инженерных сетей: Автореф. дисс. ... д-ра техн. наук: 05.13.06 / Харьков. гос. техн. ун-т радиоэлектроники. – Харьков, 1996. – 45 с.

3. Рудь И.А. Методы, критерии и алгоритмы принятия решений по эксплуатации и развитию инженерных сетей с учетом их надежности: Дисс. ... канд. техн. наук: 05.13.06. – Харьков, 2001. – 153 с.

*Получено 24.03.2008*

УДК 697.33 : 621.8.06 : 697.34

Н.А.ШУЛЬГА, А.А.БОБУХ, С.Ю.АНДРЕЕВ, кандидаты техн. наук,  
Д.А.КОВАЛЕВ

*Харьковская национальная академия городского хозяйства*

## **ОПТИМАЛЬНОЕ РАСПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕПЛОВОЙ ЭНЕРГИИ ЗАКРЫТОЙ СИСТЕМЫ ЦЕНТРАЛИЗОВАННОГО ТЕПЛОСНАБЖЕНИЯ**

Рассматриваются некоторые вопросы оптимального распределения тепловой энергии в закрытой системе централизованного теплоснабжения (СЦТ) на примере центрального теплового пункта (ЦТП).

В настоящее время количество объектов жилищно-коммунального хозяйства, оборудованных теплосчетчиками, непрерывно увеличивается ввиду учета фактически потребляемой тепловой энергии и оплаты за нее. Поэтому актуальным является решение задач оптимального распределения тепловой энергии между всеми ступенями [1] закрытой СЦТ. Одним из вариантов этих решений может быть перераспределение тепловой энергии распределяемой ЦТП между индивидуальными тепловыми пунктами (ИТП). При формальной постановке задачи оптимального распределения тепловой энергии между всеми ступенями закрытой СЦТ и управления отдельными технологическими